引用格式：顾逸东. 关于空间科学发展的一些思考. 中国科学院院刊, 2022, 37(8): 1031-1049.
Gu Y D. Thoughts on space science development. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(8): 1031-1049. (in Chinese)

关于空间科学发展的一些思考

顾逸东*

中国科学院空间应用工程与技术中心 北京 100094

摘要 空间科学是利用空间飞行器探索宇宙和自然规律，开展特殊实验的大规模科学活动，为当代科学发展作出了重大贡献。文章概述了国际空间科学的重大突破，分析了空间科学、载人探索活动的发展脉络和新趋势，回顾了我国空间科学近20年来的发展成就，总结了存在的问题和差距，强调空间科学的战略地位及其对我国科技、航天和国家长远发展的重要性。加大对空间科学的投入、制定国家空间科学规划和建立稳定预算制度是我国空间科学长期稳定发展的保证。建议充分利用科学气球、探空火箭等各种途径夯实研究基础，加强理论与实验技术相结合，培养大批高素质科学家，深化国际合作，完善科学任务管理模式等，走出中国特色的空间科学创新发展道路。

关键词 空间科学，发展规划，国家预算，研究基础，工程管理

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20220507004

2021年12月25日，詹姆斯·韦布空间望远镜①经历25年研制，多次推延，花费约110亿美元巨资后，终于在法属圭亚那库鲁发射场成功升空。该望远镜作为哈勃空间望远镜②的“继任者”，其发射过程被全球超过3亿人通过媒体观看；2022年7月12日，美国拜登政府专门举行发布会展示了该望远镜拍摄的首批全彩色图像，引起全社会极大关注。人类探索宇宙奥秘重大活动的影响可见一斑。实际上，与名气爆棚的哈勃望远镜并称为“四大轨道天文台”的，还有斯皮策太空望远镜③、钱德拉X射线天文台④和康普顿伽马射线天文台⑤，它们都取得了重大科学成果。世界多国还发射了3代测量宇宙微波背景的宇宙背

* 通信作者

修改稿收到日期：2022年7月22日

① 詹姆斯·韦布空间望远镜（James Webb Space Telescope，JWST）由美国、欧洲和加拿大联合研制，主要开展红外波段的宇宙起源、星系演化等观测研究，目前已公布了首批科学成果。
② 哈勃空间望远镜（Hubble Space Telescope，HST）于1990年4月发射，主要开展光学波段（延伸至近红外和近紫外）的宇宙学、星系、黑洞及恒星等观测研究。
③ 斯皮策太空望远镜（Spitzer Space Telescope，SST）于2003年8月发射，主要开展红外波段的宇宙学观测研究。
④ 钱德拉X射线天文台（Chandra X-ray Observatory，CXO）于1999年7月发射，主要开展X射线天文学研究。
⑤ 康普顿伽马射线天文台（Compton Gamma Ray Observatory，CGRO）于1991年4月发射，主要开展伽马射线天文学研究。

景探测器（COBE）、威尔金森微波各向异性探测器（WMAP），以及普朗克（Plank）卫星等约120多颗天文卫星，为现代天文学发展作出了巨大贡献，与地面天文台的贡献各占了半壁江山。

空间科学是探索宇宙和自然规律的空间活动，包括了空间物理学和太阳物理学、空间天文学、月球与行星科学、空间地球科学、空间生命科学、微重力物理等分支，领域广泛，并孕育了新的交叉研究方向。人类进入空间65年来，规模宏大的空间活动此起彼伏，有力推动了社会发展和科技进步。纵观几十年的空间活动，其实际效益体现在两大方面。① 空间应用。深入地渗透到经济、社会、公众生活和军事活动各方面，推动了社会信息化发展，成为当今社会不可或缺的基础保障。② 空间科学探索。人类冲破地球大气层进入太空后，开辟了全新的研究途径，科学探索的广度、深度和范围极大拓展，深入研究了发生在地球、日地空间、太阳系乃至整个宇宙的物理、化学和生命等自然现象及其规律，取得重大成就。

1 空间科学的成就和发展趋势

1.1 空间科学的成就概述

据不完全统计，在迄今为止人类发射的全部6 000多个空间飞行器中（近年发射的立方星和低轨大规模星座除外），有900多颗专门从事科学研究的卫星和深空探测器，以及多个载人空间实验室和空间站。特别是载人空间实验室和空间站作为综合性研究设施，完成了近万项科学实验，实施了几十个国际空间科学研究计划，开展了规模宏大的空间科学探测、实验和研究活动。

（1）空间物理学和太阳物理学。揭示了太阳爆发和太阳高能辐射机制；发现太阳风是携带磁场的高速等离子体流，并扩散于整个太阳系，初步揭示了太阳风与星际介质相互作用的特征和规律；发现了地球辐射带，描述了地球和行星磁层结构，以及太阳活动对地球空间环境的影响机理，建立了全新的日-地空间和行星际空间的物理图像，由此开拓了空间天气研究和保障。

（2）空间天文学。开拓了全电磁波段天文、粒子天体物理，推动天文学进入多信使新时代；发现了大批X射线、伽马射线，以及红外天体源、黑洞、中子星等致密天体和系外行星；研究了天体爆发和时变现象，揭示了极端条件下的天体物理过程，推动了宇观和微观物理研究的结合；精细测量了宇宙微波背景辐射，计算出宇宙年龄和组成，证实了宇宙的加速膨胀，推动建立了宇宙重子物质循环和爆炸宇宙学理论框架，促进对宇宙和天体认识的革命性进步。

（3）月球和行星科学（太阳系科学）。对月球和太阳系所有行星及其卫星、矮行星、小行星、彗星的物质组成、形貌、地质、大气、物理场等进行了观测或原位探测取样；对月球形成演化取得新认识，发现火星存在水和甲烷，发现土卫二等内体海洋，构建了较完整的太阳系及太阳系天体的知识体系。

（4）空间地球科学。开创并推动了地球系统科学发展，获取了全球重力场、大气流场、冰水分布动态变化，描述了海洋环流、地球能量收支，初步揭示了地球大气圈、水圈、生物圈、岩石圈耦合过程，推动了全球变化等重大科学问题的深入研究。

（5）空间生命科学。取得了人体和各类生物及其不同组成层次对微重力响应机制的重要认识，发现辐射的生物学旁效应，揭示了空间条件影响人体各系统的重要机理及对抗措施，保障了近地轨道航天员较长时间生存和活动；拓展了对生命存在条件的认识，发现了地外生命可能存在的迹象，取得生物药物空间制备的一系列成果。

（6）微重力物理科学。揭示了被重力对流掩盖的流体界面张力/浓度梯度驱动的特殊流动规律，发现微重力下物质与能量输运、相变等特殊规律；揭示了微重力燃烧过程重要本征参数，并发现冷焰燃烧等特殊

现象；空间材料科学在晶体生长动力学、过冷与非平衡相变等过程机理方面取得重要进展；基础物理方面验证了广义相对论的重要效应和超冷条件下量子新奇现象。

空间科学是当代规模空前的科学探索活动，突破性地拓展了人类视野和探索疆域，开创了地面无法实现或受限的全新实验方法，取得了革命性的重大成就，深刻地改变着人类的宇宙观和自然观；带动了高新技术突破和地面新兴产业，推动空间技术向更高水平发展，为当代科学技术发展作出了重大贡献[1]。近年来，与空间科学探测密切相关的诺贝尔奖项频次显著增加（表 1）。

1.2 空间科学酝酿新的突破

各航天大国持续重视空间科学，当前研究更加聚焦基础科学重大问题，如暗物质性质和暗能量本质、恒星和星系演化、黑洞性质、太阳系形成演化、外太空生命和宜居行星探索、基本物理规律研究、地球变化趋势等。

1.2.1 近期任务规划面向科学前沿

美国一直致力于引领空间科学发展。美国国家科学研究委员会（NRC）和各学科领域专门委员会依靠科学家群体共同形成的《十年调查》（*Decade Survey*）规划，是美国科学发展的顶层指导。空间科学各领域基本囊括在《十年调查》框架中，由 NRC、美国科学院空间研究委员会（SSB）及相关领域委员会共同研究，对空间科学未来 10 年或更长时间的科学问题、研究目标、任务建议和经费投入进行优先级排序。2021 年发布的《21 世纪 20 年代天文学与天体物理学发现之路》（Astro2020）[2]，2022 年发布的《2023—2032 年行星科学和天体生物学》[3]规划了相关领域的发展方向和主要任务，美国国家航空航天局（NASA）将滚动制定路线图并组织任务实施，实施中对项目的科学发现、技术进步、计划等进行中期评议，提出优化意见，近年陆续发布了《NASA 战略规划（2018 年）》《科学 2020—2024 年：科学卓越的愿景》等空间科学发展规划⑥。

欧洲航天局（ESA）空间科学中长期规划建立了大型（L）、中型（M）、小型（S）、国际合作、机遇任务等层次分明的分类架构，成功实施了“地平线”（Horizon）计划（1985—2005 年，1995—

表1　与空间科学探测密切相关的诺贝尔奖

Table 1　The Nobel Prize awards related to space science exploration

获奖年	获奖者	贡献及相关空间科学任务
1970	H. 阿尔文	创建太阳磁流体力学和宇宙磁流体力学（Navy Navigation Satellite卫星系统）
1995	B. 克鲁岑、M. 莫利纳、F. 克罗	利用紫外探测地球极区大气层发现臭氧洞，阐明氯氟烃对臭氧层形成、分解的作用及化学机理（Nimbus 7、Meteor 3卫星）
2002	L. 戴维斯、小柴昌俊、L. 贾科尼	在天体物理学领域开创X射线天文学，获得了探测宇宙中微子和发现宇宙X射线源的重要成就（Aerobee火箭，Uhuru、HEAO-2、CXO卫星）
2006	J. 马瑟、G. F. 斯穆特	发现宇宙微波背景辐射的黑体形式和各向异性，揭示宇宙早期物质和能量分布（COBE卫星）
2011	S. 帕尔马特、B. P. 施密特、Y. 里斯	通过观测远距超新星等，发现和证实宇宙加速膨胀（HST、COBE、WMAP卫星）
2019	J. 皮布尔斯、 M. 麦耶、 D. 奎洛兹	宇宙学的理论性发现（HST、WMAP、Plank等卫星），发现围绕类日恒星运行的系外行星（Kepler、Gaia、TESS卫星）
2020	P. 彭罗斯、 R. 根泽尔、 A. 格兹	黑洞的形成对广义相对论的有力预测，广义相对论与宇宙学，超大质量的致密天体（多颗高能和光学天文卫星）

⑥ NASA science strategy. (2022-04-29).. https://science.nasa.gov/about-us/science-strategy.

2015 年）和“宇宙憧憬”计划（Cosmic Vision，2015—2025 年），代表性的项目有太阳和日球层观测台（SOHO，1995 年）、牛顿 X 射线望远镜（XMM-Newton，1999 年）、红外/亚毫米波望远镜（Herschel，2009 年）、Plank 卫星（2009 年）、天体测量卫星（Gaia，2013 年）等，也参与了哈勃望远镜、卡西尼-惠更斯土星探测等国际重大项目，取得了独具特色的科学成果。2021 年，ESA 发布了最新版中长期发展规划“远航 2050”（Voyage 2050）⑦。该规划面向2050年，聚焦科学前沿和未来技术，提出 3 个大型、14 个中型任务方向，以及 4 个国际合作任务等；最终还将遴选出 10 项大中型任务，再征集遴选小型任务灵活实施。

美国和欧洲的空间科学规划重视平衡投资，采取多层次灵活的计划和滚动机制，采用征集竞争性提案优选科学研究项目，规划重视基础性工作和技术发展，如 NASA 从 1998 年起资助“创新先进概念”（NIAC），为未来计划提供富有想象力的可选方案；各国规划顶层协调，并在任务实施、科学统筹、协同观测等方面深入合作，大范围集聚智力和技术资源，形成相互配合互补的发展格局。

美国和欧洲的大型空间科学任务规划集中于宇宙起源演化、天体高能过程、太阳系生命和系外行星生命探索等重大方向（表 2），中小型任务涉及的领域更加广泛。

1.2.2 载人空间探索路线趋于明朗

载人空间探索路线经过长期徘徊和论证已经明确。2019 年，NASA 发布《前往月球：NASA 月球探索战略规划》⑧，正式启动了阿尔忒弥斯（Artemis）计划，明确了无人月球探测、载人月球探索、开发利

表2　美国最高优先级（含推荐）和欧洲大型空间科学任务一览

Table2　Top priority (including recommendations) in the United States and L-class space science missions in Europe

序号	任务名称	主要航天器发射时间（预期）	任务概述
1	詹姆斯·韦布空间望远镜（JWST）	2021年	NASA 6.5 m 近红外，宇宙学，星系、系外行星
2	罗曼太空望远镜（Roman）	2026年	NASA 红外光学巡天，暗能量，系外行星
3	木星冰月探测器（JUICE）	2023年	ESA“宇宙憧憬”L1 任务，木卫 2/3/4，水体/生命
4	空间引力波探测计划（LISA）	2034年	ESA“宇宙憧憬”L2 任务，激光干涉引力波天文台
5	高能天体物理学高级望远镜（ATHENA）	2028年	ESA“宇宙憧憬”L3 任务，X射线天文台
6	太阳系生命探索，木卫/土卫	2030年	ESA 远航 2050 L4 方向，JUICE 后续
7	早期宇宙探索、微波背景或长波引力波	2034年	ESA 远航 2050 L5 方向，Plank 或 LISA 后续
8	银河系探测/系外行星搜寻	2040年	ESA 远航 2050 L6 方向，Gaia 后续或大望远镜
9	火星样本返回任务（MSR）	2028年	美国 2023—2032 年行星科学和天体生物学计划推荐
10	冰巨星天王星及其卫星探测（UOP）	2031年	美国 2023—2032 年行星科学和天体生物学计划推荐
11	大型紫外/可见光/红外巡天望远镜（LUVOIR 8/15m）	2039年	美国 Astro 2020 推荐，紫外/可见/红外系外行星成像
12	起源空间望远镜（OST）	2040年	美国 Astro 2020 推荐，大型天体物理远红外望远镜
13	“山猫”X射线望远镜（Lynx）	2040年	美国 Astro 2020 推荐，大型天体物理X射线望远镜

⑦ Voyage 2050 sets sail: ESA chooses future science mission themes. (2022-04-28). https://www. esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Voyage_2050_sets_sail_ESA_chooses_future_science_mission_themes.

⑧ Forward to the Moon: NASA’s strategic plan for human exploration. (2022-04-28)[2022-07-13]. https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/america_to_the_moon_2024_artemis_20190523.pdf.

用月球和初期载人火星探索的载人探索总体规划。第一阶段（~2024年，将延期至2025年后）实现载人登陆月球南极（图1）；第二阶段完成月球南极大本营和“门户空间站”建造，“门户空间站”运行在近直线晕轨道（NRHO），可接待往返月球的飞行器，容纳航天员驻留，支持探月任务并筹备前往火星。

Artemis提出7大科学目标，包括：理解行星过程、了解挥发物周期、解释地-月撞击史、揭示太阳远古历史、利用月球观测宇宙、开展科研实验、研究深空对人体的影响及防护措施。这些科学目标基于长期的研究基础，体现了国际科学界对月球探索顶层科学问题的共识。截至2022年4月，共有16个国家参加了Artemis计划。

1.2.3 近地空间站仍扮演重要角色

作为有人参与的空间研究设施，国际空间站（International Space Station，ISS）运行24年来一直发挥着近地空间实验室的优势和重要作用，2022年初美国宣布将ISS运营期延长到2030年[⑨]。

ISS装载了20多台设备开展天文、空间环境和地球科学研究，配置了30多个专用和通用科学实验机柜开展微重力等特殊环境下人体、生命和微重力科学实验，共完成了近4 000项科学实验和应用项目，吸引了103个国家的科学家参与，在宇宙和天体、物质运动规律、人类长期太空飞行、生物药物研发、复杂流体、燃烧科学等方面获得大量成果，在*Nature*、*Science*、*Physical Review Letters*等期刊和会议上发表了近3 000篇高水平论文，出版了2 200多份科学出版物。2020年NASA发布了ISS“ISS运行20年20大科学突破”[⑩]。贯彻“将ISS利用效能最大化”的方针，美国和各参与国制定实施了多个不断滚动、科学内涵

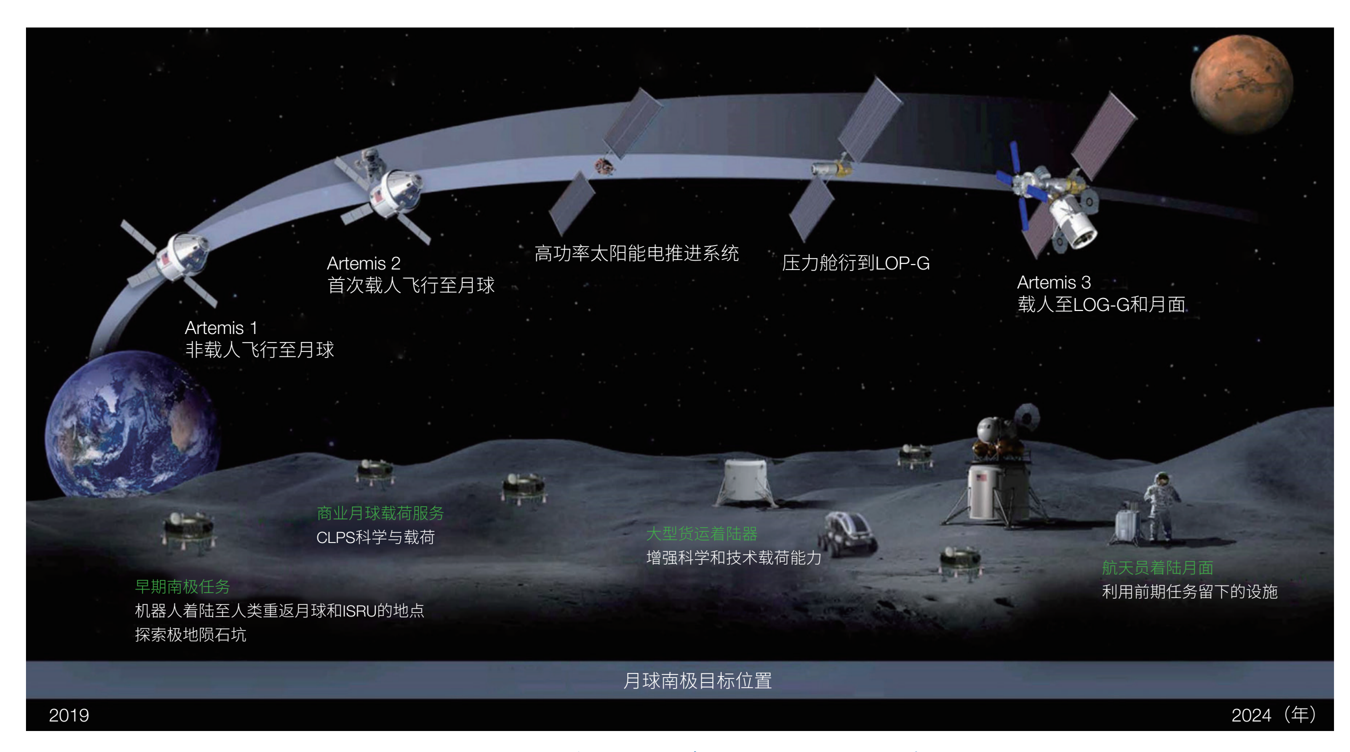


图1　Artemis第一阶段任务：2024年到达月球表面
Figure 1　Artemis phase I: To the lunar surface by 2024

⑨ Biden-Harris administration extends space station operations through 2030. (2021-12-31)[2022-07-24]. https://blogs.nasa.gov/spacestation/2021/12/31/biden-harris-administration-extends-space-station-operations-through-2030.

⑩ 20 breakthroughs from 20 years of science aboard the international space station. (2020-10-27)[2022-07-24]. https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/iss-20-years-20-breakthroughs.

逐步扩展的实验研究计划，产出的新知识和新技术不断惠及人类健康和地面产业水平提升。

1.2.4 技术变革和商业航天助力空间科学

2014 年起，美国太空探索技术公司（Space-X）开始发展垂直回收重复使用火箭技术，迄今猎鹰 9 号运载火箭（Falcon 9）已实现一级火箭和助推器的同时回收和一箭十几次重复使用；正在开发的全部可重用超重型航天器星舰（Starship），直径为 12 m、近地轨道（LEO）运载能力超过 100 吨，已完成了 10 km 高度的飞行和垂直降落测试，正在快速迭代开发推进。这种变革性技术可望将进入空间的成本降低两个量级，实现航班化的空间运输服务。此外，空间核推进、空间核能源等技术发展，将推动包括科学探索在内的人类空间活动规模和水平进入新时代，更复杂和更强大的科学装置、更具规模的深空探索可望实现，开拓新发现的机遇。

商业航天近年来爆发性增长，例如一批商业航天巨头鹊起，已在大型空间任务中承担重要角色。NASA“商业航天员计划”采购了 Space-X 货运龙飞船接送 ISS 航天员，货运龙飞船已向 ISS 运货 20 多次，为 NASA 节约了大量经费。NASA 还花费 4.15 亿美元支持了 3 个商业空间站提案的初期开发，期望在后 ISS 时代继续保持 LEO 的空间研究能力[⑪]。在 Artemis 计划中，NASA 同样通过商业采购征集舱段设计，推进商业月球载荷服务，向月面运送科学设备、实验载荷等物资。

1.3 小结

综上所述，长期的前瞻性科学规划、更具雄心的空间探索计划、不断升级的科学项目安排、变革性技术的推动，将成为国际空间科学未来更高水平发展的要素，未来 20—30 年空间科学将取得更大的成就。

2 我国空间科学的成就和近期计划

我国空间科学发展主要通过载人航天工程、月球与深空探测工程和中国科学院空间科学战略性先导科技专项（以下简称“空间科学先导专项”）等推动。在我国航天科技界共同努力下，20 年来研究水平显著提升，在极端宇宙探索、月球科学、冷原子时频、量子科学实验、微重力物理等方面取得了重要成果；一些科研机构和高校积极提出空间科学任务建议，一批重要的空间研究和探测计划正在实施，出现了蓬勃发展的良好势头。以下概述我国空间科学的成就和近期计划，并对笔者直接参加的载人航天空间科学任务和几个天文卫星的情况稍做展开。

2.1 载人航天工程的空间科学任务

2.1.1 载人飞船和空间实验室上的空间科学项目

（1）载人飞船阶段科学项目。1992 年，中央批准实施载人航天工程。在第一步载人飞船任务中，安排了我国当时规模最大，领域方向最广的空间科学与应用计划。神舟二号（SZ-2）飞船到神舟六号（SZ-6）飞船上开展了 28 项科学实验：① 空间生命科学方面，开展了多种生物的空间效应研究、蛋白质结晶、空间细胞培养、细胞电融合等实验；② 微重力科学方面，开展了半导体光电子、金属合金等材料的空间生长和晶体生长实时观察、大马兰戈尼（Marangoni）数液滴热毛细迁移实验；③ 空间天文方面，开展了宇宙伽马射线暴和太阳高能辐射探测；④ 地球科学方面，与国际同步发展了中分辨率成像光谱仪、多模态微波遥感器、卷云探测仪、地球辐射收支仪等新载荷。所有项目均为我国首次，起到了开创奠基作用，掌握了重要的空间科学实验方法和技术，推动了空间对地观测技术的跨越发展，使我国空间科学上了一个新台阶。

⑪ NASA's management of the International Space Station and efforts to commercialize low Earth orbit. (2021-11-30)[2022-07-24]. https://oig.nasa.gov/docs/IG-22-005.pdf.

（2）空间实验室阶段科学项目。2007—2017 年第二步空间实验室任务中，在神舟七号（SZ-7）、神舟八号（SZ-8）飞船，天宫一号（TG-1）、天宫二号（TG-2）空间实验室，以及天舟一号（TZ-1）货运飞船上，开展了 50 余项空间科学实验[4]。中德合作空间生命科学的 17 项实验、高等植物培养实验、空间干细胞增殖分化实验取得重要结果[5]，国际首台空间冷原子微波钟开展了原子激光冷却和操控实验，取得迄今最高频率稳定度的实验结果[6]，中国-瑞士合作的伽马暴偏振探测取得国际最大样本伽马暴偏振度累积分布函数，发现偏振度的时间变化新现象[7]；采用 Decoy 方法的量子密钥分配实验、复合胶体晶体生长实验、12 种新型材料空间制备研究、多形态液桥热毛细对流实验等取得重要结果[8]；微波成像高度计作为国际首台采用小入射角-短基线干涉-孔径合成新体制的海洋科学观测设备，开拓了海洋动力现象观测研究的新途径[9]，多角度偏振及宽波段光谱成像、紫外临边观测推动了对地观测和地球科学研究方法创新。整体看，空间实验室阶段取得了一批科学前沿和关键技术突破的重点成果，为后续开展大规模的空间科学与应用任务奠定了基础。

2.1.2 载人空间站的空间科学任务部署

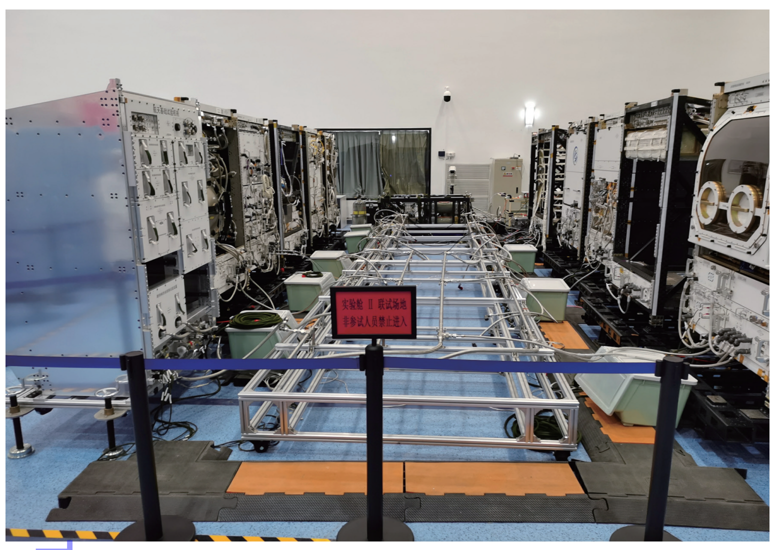
经过 30 年坚持不懈的努力，我国载人航天“三步走”的发展蓝图得以实现。载人空间站“天和”核心舱已在轨运行超过 1 年；2022 年 7 月 24 日，“问天”实验舱成功发射并与核心舱完成对接，随后还将发射“梦天”实验舱；2022 年底完成 3 舱在轨组装建造，并在轨运行 10 年以上，是我国开展大规模系统性有人参与空间研究的历史性机遇。

我国载人航天工程空间应用系统邀集组织国内近百位院士和千余位一线专家经过长期、多轮论证，形成了重点突出、层次明晰的科学与应用任务规划[10]。规划分为 4 个领域：① 空间生命科学与人体研究。深入认识生命现象本质和人在太空的响应变化规律，研究生命和医学基础问题，支持人类长期太空探索，发展生物技术，为人类医疗健康服务。② 微重力物理科学。开展流体物理（含软物质）与热物理、燃烧、材料科学的基础和应用研究，加强对地面产业的支持，基础物理安排针对基本物理规律的实验研究。③ 空间天文和地球科学。加深对宇宙暗物质、暗能量、致密天体、星系形成演化、地球变化等重大科学问题的深入理解。④ 空间新技术与应用。发展和验证新一代航天基础技术、空间科学与应用新技术等。

目前，空间站科学任务已制定了多个研究计划，到 2022 年初通过公开项目征集共收到 500 余个单位提出的超千项建议书，立项近 200 项。我国分别与联合国和平利用外层空间委员会（COPUOS）、ESA 合作征集科学项目，已批准空间生命科学、流体物理、空间天文等 19 项，约 40 个国家参与。国内外渠道都将持续征集项目，滚动培育、遴选及实施。

空间站部署了先进的科学研究设施，加压舱内有十几个科学实验柜（表 3）。舱外暴露平台安排了材料、生物、元器件等暴露实验装置。随核心舱发射的无容器材料实验柜的样品加热温度超过 2 000℃，已产出科学成果；高微重力悬浮试验在低频段指标达到 10^{-7} g；“问天”实验舱正在开展科学设备的在轨测试和调试，“梦天”实验舱的科学设备正在紧张进行地面测试（图 2）。舱内和舱外还有一批标准机柜空间和独立载荷适配器接口，空间站投入运行后将通过货运飞船上载科学探测载荷，升级和补充科学实验设施。

空间站重大科学研究设施部署了 2 m 口径巡天空间望远镜（CSST），与空间站同轨飞行，可与空间站对接进行维修升级，现已进入初样研制阶段，预计 2024 年发射，是我国空间天文的旗舰项目。CSST 具有与哈勃望远镜基本相同的角分辨率和大 300 倍的有效视场，配有大焦面巡天相机、多通道成像仪、积分视场光谱、星冕仪、太赫兹谱仪 5 个后端仪器，以



多色测光和无缝光谱巡天为主，围绕宇宙学、星系与活动星系核、银河系和恒星、天体测量、系外行星、太阳系天体和暂现源等内容开展观测研究。同时，已成立了 4 个科学研究中心和联合科学中心，立项了 24 个课题（近百项子课题），600 多位科学家参加相关科学研究和发射前的科学分析软件准备。CSST 与欧美基本同期开展的空间光学巡天项目在观测波段、

图 2　“梦天”实验舱 II 的科学装置在地面进行系统联试
Figure 2　Science racks of “Mengtian” experimental module II are undergoing system test on ground

表 3　中国空间站科学实验柜及用途概要
Table 3　Scientific experiment racks and utilizations in China Space Station

学科	序号	实验柜名称	用途
人体研究和空间生命科学	1	人系统研究机柜	长期空间环境条件下人的生理效应、人的能力研究和以发展新型防护技术为目标的实验
	2	医学样本分析机柜	样品的离心分离，并提供4°C低温冷藏条件
	3	生命生态实验柜	生物个体（植物、昆虫、小型哺乳动物、水生生物、微生物等）和细胞及组织、微生物等的重力生物学、辐射生物学研究；生物再生生命保障系统基础和应用研究
	4	生物技术实验柜	细胞和组织培养、蛋白质结晶、生物分子构建、生物力学研究及生物技术转化研究
微重力流体科学与燃烧科学	5	流体物理实验柜	流体动力学研究，各类透明体系（模型合金、蛋白质结晶、溶液晶体生长、超临界流体）实验；颗粒物质实验，胶体、软物质等复杂流体研究
	6	两相系统实验柜	蒸发、冷凝相变界面现象和相变强化换热实验，两相流传热和流体管理，两相回路系统动力学
	7	燃烧科学实验柜	固体、液体和气体的微重力燃烧过程和动力学研究，空天推进燃烧实验，载人任务材料防火实验
空间材料科学	8	高温材料科学实验柜	多温区梯度炉，用于金属合金、半导体、纳米和介孔、无机多功能材料的晶体生长、溶体生长和凝固科学实验
	9	无容器材料实验柜	静电悬浮激光加热，开展金属和非金属材料凝固机理、深过冷/高温熔体热物性测量、高熔点等新材料制备研究
微重力基础物理	10	超冷原子物理实验柜	超低温、大尺度（mm/cm）、长时间的玻色与费米量子简并气体实验条件下的低温临界点量子性质
	11	高精度时频实验柜	氢钟、冷原子钟和光钟组成，稳定度/不确定度10^{-17}—10^{-18}量级的高精度时间频率下的基础物理研究和应用研究
共用支持实验柜	12	科学手套箱与低温存储柜	航天员直接参与操作的生命科学和其他科学实验，以及样品和实验准备；低温下样品保存
	13	变重力科学实验柜	0.01—2 g范围内的流体、生命、材料科学方向的常重力、低重力和超重力实验
	14	高微重力科学实验柜	微推和电磁两级悬浮，创造10^{-6}—10^{-7} g高微重力水平，开展等效原理验证等基础物理实验和其他实验
	15	在线维修装调操作柜	独立载荷在轨实验，以及有效载荷模块或单元准备、清洁、焊接、润滑、组装、测试，故障诊断和维修

分辨率等方面协同互补（表4），将成为继地面斯隆数字巡天（SDSS）后最具科学发现潜力的光学天文巡天任务。

在空间站建造之后的应用与发展阶段，规划了第二个旗舰型项目——高能宇宙辐射探测设施（HERD）。这是我国主导、欧洲多国合作的重大空间科学项目[11]。它采用了创新的三维量能器和完善的系统设计，其测量宇宙线中电子和核子的能量范围和探测灵敏度比现所有设备高1个量级或数10倍（电子扩展到100 TeV，核子探测能区扩展到3 PeV），高能伽马射线观测的视场和能区有数倍的增加。HERD将以前所未有的能力开展宇宙线起源、成分、加速机制研究，测量高能电子和伽马射线能谱搜寻暗物质信号，开展高能伽马射线巡天监测，成为同时代最强大的空间暗物质搜寻和宇宙高能辐射探测研究设施。

2.1.3 载人月球探测的酝酿和规划

我国正在酝酿和规划载人月球探测，将分为关键技术攻关和深化论证、载人登月和月球科研站3个阶段分步推进。为夯实载人月球探测基础，更好地规划载人月球任务的科学探索和应用，已广泛征集了大量研究建议，组织国内各方面专家开展了反复论证，形成了初步共识。

（1）月球科学方面。月球形成、月球内/外动力演化、月表特殊环境、水和挥发分分布与来源等是月球科学、地月系统乃至太阳系形成演化的重大科学问题。

（2）月球利用方面。要更深入研究月球地质与资源分布、物质高效利用与循环体系、低重力物质运动规律，开展独特的月基观测研究。

（3）月面生存方面。将加强人体和生物响应机制与适应调控、辐射防护、月面生态系统与生存保障研究和技术开发。

在上述研究任务的基础上，先期安排了数字月球、月面地质与资源勘查、月球空间环境要素探测、月尘探测及作用机理、月球样品采集检测与封装等关键技术攻关。为支撑载人月球探测工程实施和月面活动，获取更多科学产出和应用效益，已开展了载人登月着陆区遴选、高精度全月面三维地形测绘和资源勘察、月面科学与应用任务方案等论证。我国载人月球探测将在载人航天和无人月球探测长期积累的工程技术和科学研究基础上稳步推进。

2.2 科学卫星

2.2.1 空间科学先导专项卫星

中国科学院在2003—2004年实施了地球空间双星探测计划，这是我国第一个真正意义上的科学卫星任务，具有开创意义，也是与ESA星簇计划（luster）相配合的国际合作项目，在磁层亚暴、磁暴和磁层粒子暴的触发机制等方面取得重要成果。随后，经国务院批准，2011年中国科学院正式启动实施空间科学先导专项，其以科学卫星计划为核心，对推动我国空间科学发展具有重大意义。

（1）专项一期的科学卫星。空间科学先导专项一期有较高起点，实施的4个科学卫星计划均取得了显著成就：① 暗物质粒子探测卫星“悟空号”

表4 中国巡天空间望远镜（CSST）与同期欧洲欧几里得（Euclid）、美国罗曼（Roman）巡天望远镜主要指标对比
Table 4 Comparison of main indicators of China's CSST, European Euclid and American Roman space telescopes in same period

名称	轨道	发射计划	口径（m）	视场角（deg^2）	角分辨率	像元数量（亿）	观测天区（deg^2）	观测波段（μm）
中国CSST	LEO	预计2024年	2	1.1	0.15″	25	17 500	0.25—1，THz
欧洲Euclid	L2	预计2023年	1.2	0.56	>0.2″	6	15 000	0.55—0.92，1—2
美国Roman	L2	预计2026年	2.4 m	0.28	>0.2″	3	2 400	0.927—2

（DAMPE，2015 年）。直接测量了宇宙射线电子能谱在约 1.4 TeV 处的拐折，对于判定部分能量低于 1 TeV 宇宙线电子是否来自于暗物质起着指引作用[12]；② 实践十号返回式科学实验卫星（SJ-10，2016年）。开展了 28 项微重力和生命科学实验，包括在国际上首次开展的 15 项，在空间生命科学与微重力流体方面获得了新认知[13]；③ 量子科学实验卫星“墨子号”（2016 年）。在国际上率先实现了星-地千公里级双向量子纠缠分发[14]和相距 1 200 km 两个地面站间的量子态远程传输；④ 硬 X 射线调制望远镜卫星“慧眼号”（HXMT，2017 年）。是我国第一颗 X 射线天文卫星，以天文台模式运行，共征集了 194 个核心和客座观测提案，93 个机遇观测提案，涉及观测目标超过 500 个，参与的国内单位 21 个，国外单位 15 个。HXMT 运行 4 年多来成果丰硕，截至 2022 年初相关成果共发表论文超过 100 篇，重要科学成果包括：对首个双中子星并合引力波事件在 0.20—5 MeV 能区给出了最严格的限制[15]；通过发现 90 keV 最高能量中子星回旋吸收线测量到的宇宙最强磁场约为 10 亿 T[16]；通过在黑洞系统测量到能量高于 200 keV 的最高能量准周期振荡信号，发现距离黑洞最近的相对论喷流；发现首例与快速射电暴关联的 X 射线暴，并且证认其来自于银河系磁星 SGR J1935+2154[17]；发现黑洞双星中逃离黑洞强引力场向外高速运动的等离子体流等。

（2）专项二期进展。空间科学先导专项二期目前正在实施中。① 微重力技术实验卫星“太极一号”（2019 年）。实现了高精度空间激光干涉测量，测试了微牛量级射频离子和霍尔两种微推技术。② 引力波暴高能电磁对应体全天监测器（GECAM，2020 年）。成功观测到伽马射线暴、天蝎座 X-1 的地球掩食、X 射线脉冲星和太阳耀斑等。③ 正在研制的另外 3 颗科学卫星。先进天基太阳天文台（ASO-S）、爱因斯坦探针（EP）、太阳风-磁层相互作用全景成像卫星（SMILE）进展顺利，将于 2022—2024 年陆续发射。其中，EP 卫星（图 3）致力于 X 射线时域天文，目标是发现 X 射线剧变天体，探索沉寂黑洞耀发和引力波源 X 射线信号等，载荷为宽视场望远镜（WXT）和后随望远镜（FXT），探测能段 0.5—4 keV。WXT 在国际上首次大规模采用龙虾眼微孔X射线成像技术和 CMOS X 射线探测器，12 个子望远镜形成 3 600 平方度大视场进行凝视监测，探测到耀发信号后触发卫星姿态机动使天体目标进入 FXT 视场（38′）；FXT 采用 Wolter-I 型掠射聚焦望远镜，以更高的分辨率（30″）和定位精度（优于4″）开展精细后随观测，并通过北斗短报文等星地链路传递耀发天体坐标信息，引导其他天地设备协同观测。EP 的强大探测能力可望取得高水平的科学产出，已转入正样阶段。

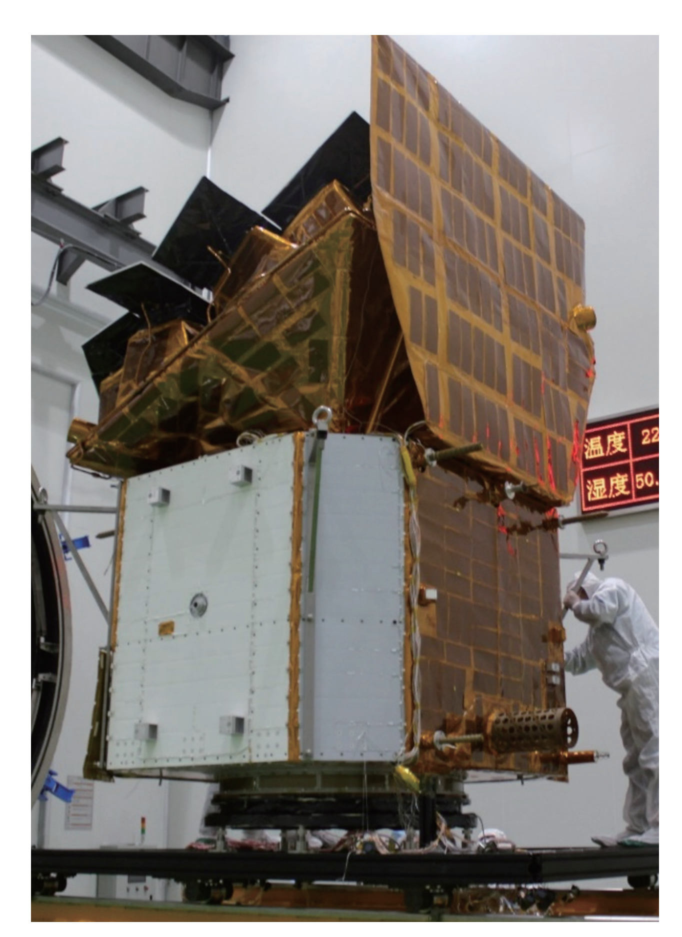


图 3　爱因斯坦探针卫星正在准备进行热真空试验
Figure 3　Einstein Probe Satellite is preparing for a thermal vacuum test

空间科学先导专项还部署了一批重要的科学背景型号，包括空间引力波探测（太极计划）、X 射线偏振与时变探测卫星（eXTP）两个大型项目，以及中高轨量子卫星等十几项任务，正在推动三期科学卫星项目的深化论证和遴选，围绕极端宇宙、时空涟漪、日地全景、宜居行星等科学主题，争取更高水平、更先进的科学卫星进入后续实施。

2.2.2 其他科学卫星

2010 年以来，我国国家国防科技工业局、科学技术部和有关部委、相关高校，启动和规划了一批科学卫星或试验性卫星，包括全球二氧化碳监测卫星（TANSAT，2016 年）、张衡一号（2018 年）电磁监测试验卫星、天琴一号空间引力波技术试验卫星（2019 年）、羲和号太阳探测科学技术试验卫星



图 4　宇宙暂现源监视器卫星的测试场景

Figure 4　Test scenarios of SVOM (Space Variable Objects Monitor) satellite

（2021 年）、清华大学采用微纳卫星的“极光计划”（2018 年）和“天格计划”，以及中国科学院可持续发展科学卫星 1 号（SDGSAT-1，2021 年）等，取得了一批重要成果。

宇宙暂现源监视器（SVOM）卫星是中法两国航天局合作框架下的天文卫星（图 4），目标是发现和快速定位伽马暴，全面测量伽马暴的电磁辐射性质，研究伽马暴及其余辉。科学载荷由中法双方分工研制，包括伽马监视器（GRM），编码孔径 X 成像仪（ECLAIR）、软X射线成像（MXT）、可见光望远镜（VT）。在轨观测时，探测到爆发现象时将依次触发不同波段探测器、卫星姿态逐次机动实现天体目标辐射能区由高到低观测，获取伽马射线暴和其他变源在各能区辐射特性及随时间变化规律。目前，卫星已转入正样阶段，计划 2023 年发射，有望在宇宙暂现源研究等方面取得创新成果。

2.3 月球与深空探测

2.3.1 探月工程

我国嫦娥探月工程于 2006 年被列为国家重大科技专项。工程规划为“绕、落、回”三期，在环月探测、月面着陆巡视、月背着陆及采样返回等重大技术和科学研究方面取得瞩目成就，为我国进一步开展深空探测活动奠定了坚实基础。

嫦娥一号实现了我国首次月球环绕探测，取得我国首幅月球地质图和月球构造纲要图。嫦娥二号完成了更高分辨率的环月探测，获取了 7 m 分辨率的月表三维影像数据和多种元素全月面分布数据。嫦娥三号首次实现落月，开展了月面巡视勘察，获得着陆区月壤的化学组成、矿物组成、月壤厚度及其下覆三套玄武岩等的系列成果。

嫦娥四号和嫦娥五号实现了工程技术重大突破，科学探测取得重大成果。嫦娥四号实现了人类航天器首次月球背面软着陆，揭示了月球背面地下 40 m 深度内的地质分层结构和月幔的物质组成，首次在月表

开展能量中性原子的就位探测和月表粒子辐射环境探测。嫦娥五号完成了月表铲取和钻取、采样封装并成功返回地球，获得 1 731 g 月壤样品，通过样品分析发现月球的岩浆活动一直持续到距今约 20 亿年，月球地质寿命比此前推测的又延长了 8 亿年；精准测定了玄武岩样品形成年龄为 20.30±0.04 亿年，将之前认定的岩浆洋活动时间延长了 800 万—900 万年[18]，估算到玄武岩月幔源区的最高水含量小于 5 μg/g[19]。

嫦娥探月四期工程已于 2021 年经国家批准，以月球南极地区作为主要探测目标，规划了嫦娥六号、七号和八号任务，2024—2030 年实施，实现月球背面采样、月球南极巡视探测，并计划与俄罗斯等国家合作在月球南极建设国际月球科研站基本型。

2.3.2 小行星与深空探测

我国首个火星探测器天问一号于 2020 年7月发射，国际上首次第一次任务就实现火星环绕、着陆和巡视探测，开展火星形貌与地质构造特征，火星土壤特征与水冰分布、物质组成、大气电离及气候与环境特征，火星物理场与内部结构等探测研究。至今天问一号巡视器、着陆器、环绕器均正常工作，获取了大量科学数据。我国正在酝酿和规划 2030 年左右实施火星采样返回任务。

小行星采样返回任务预计 2025 年前后实施，计划通过一次发射实现近地小行星采样返回和主带彗星绕飞探测，对太阳系典型小天体的特征和演化机理、太阳系早期物质和生命信息等进行研究。

我国正在酝酿论证木星系探测及太阳系边际探测，主要研究木星磁层结构、木卫二大气和冰层，寻找地外生命信号，以及研究日球层大尺度三维结构、太阳风传播演化、日球层边界和星际空间特征等，并穿越探测木星、土星、海王星等外太阳系天体，研究太阳系起源与演化。

3 我国空间科学发展的思考和建议

我国空间科学已取得一批重要成果，一些重点方向有所突破，具备了一定的国际竞争力，但毕竟起步较晚，基础不够雄厚，目前处于关键发展阶段。面对以美国为主、欧洲等国家和地区合作推动的国际新一轮空间科学计划和新发展态势，我国空间科学要进入国际前沿，任重而道远，必须清醒认识我国与国际先进水平的差距，深入分析问题和原因，从根本上采取措施，提高水平，做长期艰苦的努力。

3.1 存在的问题

（1）空间科学支持力度不足。长期以来我国空间科学活动规模小，投入不足，从2015年起虽有显著提升，但与我国航天活动整体规模相比仍相当不平衡。2015—2021 年底我国共实施226次航天发射（全球占比 30.75%）⑫，其中空间科学相关发射次数约 5%（含科学卫星、月球与火星探测器），期间我国空间科学经费投入仅约全球的 3%—5%，在轨科学卫星数量为全球的 9.6%，尚未建立完整的科学卫星系列；载人航天、月球和深空探测等国家科技重大专项中的空间科学经费比例也远低于国际平均水平，前期研究、地面实验、仿真和数据分析等投入低，支持渠道匮乏。

（2）与国际先进水平差距显著。2011—2020 年我国空间科学论文数量年均增长率较高，总发文量从 2017 年开始稳居世界第二⑬，但论文篇均被引频次在发文数量前10位国家中排名垫底；2011—2020 年中国作者发表论文采用我国自主任务数据的仅占 20.5%（2000—2011 年该数字为 5.2%），且迄今尚未产生有重大科学影响、国际同行公认的成就。我国空间科学队伍规模小，一些重要领域（如空间天文、月球与行星科学等）的研究人员数量仅为美、英等单个国家的十分之一。分析更深层次的要素，我国在科学领军

⑫ 2015—2021 年底我国航天发射次数统计 . [2022-05-06]. http://www.spacelaunchreport.com.

⑬ 截至 2020 年底排名为：美国、中国、德国、英国、法国、意大利、日本、西班牙、荷兰、加拿大。

人才数量和国际影响力、基础研究积累、科学认知水平、技术和方法原创力、任务经验积累、开放学术氛围、国际化程度等方面尚有巨大差距。

3.2 空间科学的战略地位

我国空间科学发展滞后的根本原因之一，是对基础研究重视不够，对空间科学重要性认识不足，这是发展理念问题。空间科学属基础研究，需要较大投入，但往往存在“不那么重要和紧迫”“锦上添花”等错误认识，与空间任务相比处于弱势地位。近年来科技界和领导层高度重视基础研究对解决“卡脖子”问题和作为技术创新之源的重要性，无疑是正确的。从更宏观的科技发展和人类文明进步历史看，近代技术革命和产业变革都是由科学革命引发的。17 世纪以来的经典力学、电磁学、数学、进化论等构建了近代科学体系并奠定了现代工业基础；20 世纪初以量子论、相对论为核心的科学革命，造就了近百年来的科技繁荣和新兴产业。科学进步永无止境，面对未来可能的科学革命，我国不能无所作为，而应当为人类作出更大贡献，并为我国当前和未来科技、产业发展积淀深厚的科学基础；造就探索未知、求真溯源、开放理性的科学精神，使我国空间科学发展根深叶茂，行稳致远，这应是建设科技强国的深度内涵。

爱因斯坦曾指出：“未来科学的发展无非是继续向宏观世界和微观世界进军”。空间科学链接了宇观和微观研究的前沿，包括挑战现代物理学基础的暗物质性质、暗能量本质，极端宇宙的物理规律，并涉及太阳系和地球演化、生命起源与本质等基本问题，可能推动新科学革命。空间科学还延伸到利用空间特殊环境的重要应用基础研究，领域广阔，充满发现机遇，各大国将其视为空间时代的大科学和战略必争领域。空间科学应当作为我国基础研究的重点突破口之一。

我国正在向建成科技强国、航天强国的目标迈进，空间科学是其中突出的短板，要进一步加强空间科学、空间技术和空间应用的全面协调发展，将提高空间科学地位作为航天科技领域的重点任务，获取重大成果，实现跨越发展[20]。空间科学挑战极限和不断超越的需求，也将成为空间技术向更高水平发展的不竭动力。

3.3 空间科学规划和预算

高水平的长期规划、稳定的预算，这两个顶层要素是我国空间科学长期稳定高水平发展的保障。

3.3.1 制定国家空间科学规划

空间科学面向科学前沿，高风险、高回报，必须长期规划，深厚积累，组织定向基础研究，精心实施。国际上成功的经验表明，获得重大成果的空间科学项目往往经历十几年至二十几年的科学准备、技术突破和研制试验，或经历几代空间任务的积累提升。我国不少空间科学项目准备时间短，存在诸多薄弱环节，或主要追求技术成果，影响科学产出。目前，我国空间科学规划分散在各部门和各专项，各抓一面，分段规划，主要是推出项目，缺乏长期战略、顶层规划、能力建设、配套措施和资源统筹，也存在争经费、“保地盘”等因素干扰。要改变这种分散局面，发挥国家战略科技力量主力军作用和高校等各方面积极性，制定统一和长期、持续的国家空间科学规划，形成国家“一盘棋”。

规划应坚持科学导向和重大科学产出原则，发挥科学家的核心作用，广泛征集建议；结合战略科学家队伍，不断研究重大科学问题和前瞻发展趋势，凝聚科学界共识，及时响应最新动向，提出科学方向、发展路径、优先分级、任务指南。规划应包括空间科学各领域，如深空探测是研究月球和行星科学的主要途径，是空间科学的组成部分，不宜单列；空间地球科学的研究性质突出，与各类对地观测业务卫星的目标和手段不同，应在空间科学规划中包括；空间生命科学和微重力科学在空间规划中应得到重视，不能完全依靠其母学科规划。规划周期至少 10—15 年，近中远

结合，定期滚动迭代。

规划应全面部署基础能力提升，制定具体计划加强空间科学各方向的研究基础、学科布局和人才培养，落实重要研究设施的建设运行，部署新一代重要探测技术攻关，提出重要政策措施和国际合作战略。

要建立有效的跨部门统筹协调机制，在国家空间科学规划指导下理顺分工职责，从科学任务概念的研究、预先研究、技术攻关、工程研制、在轨运行、研保条件、科学应用和数据系统、软件工具开发、数据分析研究，到成果产出和转化的全链条形成完整的支持体系。

3.3.2 建立稳定的空间科学预算

发展空间科学需要增加投入，投入比例是政策的具体体现。近20年国际上主要国家航天局总预算年均约370亿美元，其中直接空间科学预算占比27%，年均约100亿美元（其中美国60多亿美元），其投入规模（加上空间设施运行）和运营性质与全球地面大科学装置的投入具有可比性。我国应加大对空间科学的投入，在民用航天中经费占比达到15%并逐步提高到国际平均水平，建立科学卫星系列，同时载人航天、月球与深空探测等国家科技重大专项也应落实对相应空间科学的合理投入，保证科学目标实现。

空间科学任务的复杂性和长期性特点，以及扩大科学队伍规模、集聚高层次人才等都需要稳定的国家预算支持。突破财政年度和5年周期的预算是制定长期规划的基本条件，建议国家财政单列空间科学预算账户（稳定基数，可随国家财政状况微调），改变根据每项具体任务编列预算的办法，使空间科学整体发展和长期任务有稳定的预期，以及更高的经费使用效率。

3.4 夯实空间科学发展基础

空间科学不是有了经费，扩大了规模就能出成果的。空间科学追求首次发现和规律性认识，既要有国际视野和自主的科学思维，又要有创新的探测技术和实验方法，基础厚实极为重要。我国近几年发射卫星数量和空间活动规模快速增长，引发了一些急于求成的心态，认为有了好的想法，做了一些仿真计算就可以在卫星和空间站上实施，或单纯通过探测领域的扩大就能够取得成果，这不禁令人担心在规模扩大时我们的水平能否真正上台阶。我国空间科学必须摆脱单纯以空间项目为中心的思想，重视其背后需要进行的多方面巨大努力。长期努力提升科学和技术水平，不断培养高水平人才，厚植基础，才能培育出具有独特性和国际竞争力的空间项目。

3.4.1 加强地面和多渠道实验研究

空间科学是以观测和实验为基础的科学，需要通过地面实验和各种途径加强实验研究，提高能力水平。

空间科学先进国家通过低成本途径（科学气球、探空火箭、空间搭载等）拓展空间科学任务规模，激励新颖科学思想，验证创新技术，培育年轻领军人才，扩展人才队伍，以及作为夯实研究和技术基础的重要途径。美国NASA、法国国家空间研究中心（CNES）和日本、加拿大、印度、瑞典等国航天机构均配备了科学气球和探空火箭系统[21]，NASA常年发射大型科学气球（高度35—45 km，载荷数t）和探空火箭（高度约350 km），累计各2 000余次，21世纪初开始的南极长时间气球探测计划，实施了20多项颇具创意的大型探测任务（粒子/非粒子天体物理计划），其中两项已升级进入国际空间站，还开展了一系列有特色的大气和地球科学观测和重要技术试验；在Artemis计划中已征集并初步确定了十几项立方星月球探测和技术验证搭载项目。法国作为欧洲科学气球中心，长年实施“用百分之一的经费获得百分之十的收益”的科学气球计划，且近年又在扩大科学气球的活动区域。

我国已具备开展科学气球探测和探空火箭活动的技术基础。取得重要科学成果的“悟空”卫星（与美

国 ATIC 南极气球任务合作）、“慧眼”卫星（直接解调成像方法验证）都有气球飞行实验的重要基础。我国应发展大型科学气球，配备相关设备，建立常态化科学气球运行系统，条件具备时开展南极长时间气球飞行；探空火箭要配置合理型谱，在已有基础上形成运行系统，安排落实科研基础设施，建立面向全国征集项目，将开展科学探测和技术试验作为有效常规手段。其他低成本方法在我国也有先例，例如清华大学“极光计划”的立方星 X 射线偏振探测取得重要成果[22]，正在推进后续“天格计划”；我国空间站也推出了搭载计划。利用各种低成本机会开展实验，是加强研究基础和技术研发的有效途径。

为保证在国际空间站上开展的生命和物理研究项目具有更高水平，参与各国普遍采用了“培育-淘汰”的优选流程，征集后的初选项目给予少量经费开展地面研究和实验。通过 Pre-phase A（概念研究）和 Phase A（概念及技术开发）阶段的实验结果和严格的同行评议⑭，筛选少部分优秀项目进入飞行任务阶段，优选比例约 1/5。地面实验普遍采用微重力落塔、微重力飞机和其他模拟方法进行验证。

我国已具备开展微重力落塔实验的条件，正在建设更强性能的微重力设施，需要全面安排好这些实验设施的建设发展。我国空间站实验要形成项目池和项目优选机制，充分利用各种手段加强科学研究、地面实验和与设施设备的匹配实验，争取高水平成果。

科学数据是空间科学实测（实验）的结果。我国长期利用国外空间数据开展科学研究，取得不俗成绩，并为自主空间项目进行了有效准备。随着我国自己的空间科学数据越来越多，加强数据共享利用有利于多出成果，发挥效益，并可吸引更多团队参加，加强研究基础。要破除影响数据共享的各种壁垒（包括对地观测数据用于地球科学等研究），制定数据标准，发展数据分析软件，最大限度地实现数据共享和再利用。

3.4.2 加强理论、实验与技术深度结合

空间科学要在观测和实验基础上达到探索未知、认清规律的目的。从以下两类科学产出分析理论、实验和技术结合的重要性。

（1）发现性和描述性科学产出。从观测和实验中发现新现象，发现可能颠覆现有科学规律（破缺）迹象，解释现象背后的科学成因，勾画出未知的物理图像或过程脉络，发现新现象的科学机理，这些都是重大科学成果。在这个过程中，科学思想（科学洞察力）、探测和实验技术（往往要有超越性的技术和方法）、准确理解实验结果（条件变化、测量误差和置信度、统计分析结果）、数据分析工具包，以及对实验结果的科学解释都是非常重要的；大数据挖掘、人工智能将成为更有效的研究分析工具；科学仿真，特别是“端到端”仿真（观测目标-传递路径、载荷与系统响应-模拟数据生成），和进一步的“数字孪生”用于设计验证，要素影响评估、测试结果确认、数据处理准备、运行参数调整及流程规划，成为任务全周期和提高研究水平的重要环节，需要科学家、实验专家、技术专家和数据分析专家深度结合。我国各领域、各单位情况有较大差距，普遍存在科学与技术分离，任务全链条力量不完整等问题。小课题组模式已显现出局限性，需要在重要方向形成强大完整的团队，在重要任务中加强组织，多单位优势互补，集聚高水平人才，开展细致交流，加强各类工作的融合。

（2）创建性或颠覆性的理论突破。其对科学发展有重大影响，诺贝尔科学奖比较青睐这类成果，而这方面目前是我国的突出短板。创建性或颠覆性的理论突破需要理论学家（和部分数学家）不断研究和推出关于宇宙、天体、物质、热力学、太阳系、地球、生

⑭ NASA Systems Engineering Handbook, Program/Project Life Cycle. [2022-05-05]. https://www.nasa.gov/seh/3- project-life-cycle

命等不同层次重大科学问题的新学说、新模型和“大理论”。建议设立“研究特区”，动员和吸引理论学家关注和参与空间科学规划，指导空间科学项目，了解空间实验情况和结果，加强与实验科学家交流，发展复杂系统数值模拟。我国专注“大理论”的高级研究人才比实验人才更加欠缺，可遇不可求，因此特别需要开辟适宜土壤长期培育。

3.4.3 加快空间科学人才培养

空间科学人才不足将严重影响未来发展，因此我国首先需要采取措施扩大空间科学人才队伍规模。高校和研究机构应加大空间科学相关研究生招收培养数量，不断提高培养质量，这可能是较快的解决办法。高校要全面部署与空间科学各领域相关的学科设置。

更多的空间科学项目，包括采用低成本途径的项目是培养具有科学素养和实践经验人才的重要途径。例如，培养空间科学各领域的科学家、科学探测及实验技术专家，以及具备综合能力、能组织领导空间科学任务的项目首席科学家和管理专家。大型空间科学任务和国际合作项目应设立专门人才计划，吸引国内外学者和高素质青年人才。

部署空间科学重要领域的国家实验室或全国重点实验室，通过实验室建设承担国家空间科学任务，集聚并长期稳定高水平人才，形成专家群和完整的综合性团队。

3.4.4 加强空间科学国际合作

空间科学与所有基础研究的性质相同，是全球性的，国际合作已经成为各国空间科学发展政策的重要组成部分。我国空间科学的国际合作已有诸多成功经验，如地球空间双星探测计划与ESA的合作、空间科学先导专项卫星任务多层次的国际合作[23]、载人航天工程中的中德空间生命科学合作、中国-瑞士合作伽马暴偏振探测（POLAR）等均取得重要成果；正在实施的一批重要国际合作计划，包括中法合作的太空望远镜（SVOM）项目、中-欧合作太阳风-磁层相互作用全景成像卫星（SMILE），以及EP卫星与ESA、CNES等的合作，中国空间站与COPUOS和ESA联合征集科学实验项目合作等，这些对我们提升全球视野、提高水平、打牢基础、提升国际影响力均发挥了重要作用。

在当前国际形势下，仍要坚持贯彻开放、合作方针，积极参加重要国际空间科学计划、双边和多边项目合作，积极推动我国牵头的空间大科学计划，开放我国重大专项（空间站、探月工程等）的空间科学计划和科学卫星计划，征集国外科学家的项目建议，开展国内项目的国际评审，促使我国空间科学进入国际前沿。

要充分发挥科学家在开展学术交流和形成国际合作项目中的作用，鼓励支持我国科学家积极参加国际会议和国际组织的活动并任职，形成活跃的有影响力的国际交流人才队伍；加强我国空间科学各领域与国外对口专业机构（研究中心、实验室等）之间的密切交流，形成长期稳定的合作关系；要举办和参加各种科学讨论会和工作会议，积极参与COPUOS的活动，显著提升我国空间科学的国际影响力。

3.5 完善空间科学任务管理模式

空间科学的实施体现为航天工程任务（科学卫星、深空探测）或其中的重要组成部分（载人航天工程等），具有显著的科学与工程结合特点，也经常显现出科学文化与工程文化的冲突与融合。如何完善空间科学相关任务的管理，是我国空间科学发展的重要课题。

3.5.1 处理好科学与工程的关系

多年来，我国已经形成了完整的航天工程管理体系；空间科学滞后进入，需要一个理解、适应和提升过程。总体上，要坚持“科学（应用）是最终目的，工程是根本保证”的理念，既要满足科学任务特殊要求，也要遵从航天工程高可靠（载人航天还有高安全性）的要求。

科学与工程两者有不同的内在需求和规律差异。例如，我国航天工程重视状态管理（设计状态、初样和正样状态），把技术状态作为基线严格管控、保证质量，这也是我国航天工程普遍采用由多个系统组成大系统的管理模式所需；而这要求科学载荷很早就确定技术状态和接口，对许多项目而言难以适应。在欧美的一些大型空间科学任务中，特别重视科学需求（科学任务对工程的需求），项目以科学需求文档（SRD）为核心贯穿研制全周期和天地系统，不断挖掘科学潜力，不断迭代，即使在详细设计（CDR，相当于正样设计）和系统测试后，仍要按SRD或新需求更改完善，笔者认为这更加符合科学规律和保证产出的理念。这种理念可行的基础是科学家主导下的合同制管理模式，即使空间科学先导专项科学卫星给予首席科学家一票否决权，但也还不具备完全实施这种模式的条件，遑论其他，但今后肯定要推行这种理念。我国航天工程的阶段划分还不能贴切地反映科学载荷与飞行器的差异，特别是科学载荷测试验证、标定，以及匹配实验等细致工作需要时间，而目前往往过于紧张。

载人航天工程在国内外都被赋予了体现国家威望等更广泛的意义，总体上与其中的科学任务是可以很好兼顾的，我国空间站工程正在不断探索完善。在空间站长期运营的科学项目管理中，管理的高效性、项目培育遴选、立项程序和时效、资源分配、余量管理、系统间协调、流程改进、质量标准、进度安排等方面还有很大改进空间，需要防止重进度、轻科学产出的倾向。

我国航天工程管理体系是长期实践经验的宝贵结晶，但也要与时俱进，将科学任务特点和科学产出最大化理念纳入更完善的工程管理方法中。

3.5.2 重视发挥科学家的作用

科学家群体应在制定我国空间发展战略、长远规划、项目论证、评审遴选、同行评议、任务评估、成果评估中发挥主体作用。特别是在空间科学任务中，科学家及科学家团队应当发挥核心作用，在立项、科学目标确定、指导系统研制、测试验收、地面系统、科学分析等全过程中保证科学目标实现。目前，多项空间科学任务已经采用了首席科学家负责制，或是科学家、总工程师和总指挥“三首长制”，科学家开始发挥作用，但还很有限。在现有以行政领导为主的管理架构中，涉及科学产出的重大问题如何决策，首席科学家及责任科学家团队的实际地位和作用发挥如何保证，还要继续探索和积累经验，通过管理规定逐步成型。此外，我国还需要培养出一批懂科学、懂管理、懂载荷、懂工程、理解科学任务特点规律的复合型领导人才，为空间科学任务更好体现科学导向发挥重要作用。

参考文献

1 国家自然科学基金委, 中国科学院. 中国学科发展战略·空间科学. 北京: 科学出版社, 2019.
National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences. China Discipline Development Strategy·Space Science. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)

2 Board S S. Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s. Washington, DC: National Academies Press, 2021.

3 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Origins, Worlds, and Life: A Decadal Strategy for Planetary Science and Astrobiology 2023-2032. Washington, DC: National Academies Press, 2022.

4 Gu Y D. Physical Science items of China's human space project in near future. International Journal of Microgravity Science & Application, 2015, 35(2): 23456.

5 Lei X H, Cao Y J, Zhang Y, et al. Effect of microgravity on proliferation and differentiation of embryonic stem cells in an automated culturing system during the TZ-1 space mission. Cell Proliferation, 2018, 51(5): e12466.

6 Liu L, Lü D S, Chen W B, et al. In-orbit operation of an

atomic clock based on laser-cooled ^{87}Rb atoms. Nature Communications, 2018, 9(1): 2760.

7 Zhang S N, Kole M, Bao T W, et al. Detailed polarization measurements of the prompt emission of five gamma-ray bursts. Nature Astronomy, 2019, 3(3): 258-264.

8 Kang Q, Wu D, Duan L, et al. The effects of geometry and heating rate on thermocapillary convection in the liquid bridge. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 881: 951-982.

9 Ren L, Yang J S, Jia Y J, et al. Sea surface wind speed retrieval and validation of the interferometric imaging radar altimeter aboard the Chinese Tiangong-2 space laboratory. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(12): 4718-4724.

10 高铭, 赵光恒, 顾逸东. 我国空间站的空间科学与应用任务. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 721-732.

Gao M, Zhao G H, Gu Y D. Space science and application mission in China's space station. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(6): 721-732. (in Chinese)

11 Zhang S N, Adriani O, Albergo S, et al. The high energy cosmic-radiation detection (HERD) facility onboard China's Space Station. SPIE, 2014, 9144: 293-301.

12 Ambrosi G, An Q, Asfandiyarov R, et al. Direct detection of a break in the teraelectronvolt cosmic-ray spectrum of electrons and positrons. Nature, 2017, 552: 63-66.

13 Hu W R, Zhao J F, Long M, et al. Space program SJ-10 of microgravity research. Microgravity Science and Technology, 2014, 26(3): 159-169.

14 Dai H, Shen Q, Wang C Z, et al. Towards satellite-based quantum-secure time transfer. Nature Physics, 2020, 16(8): 848-852.

15 Li T P, Xiong S L, Zhang S N, et al. Insight-HXMT observations of the first binary neutron star merger GW170817. Science China Physics Mechanics & Astronomy, 2017, 61(3): 1-8.

16 Ge M Y, Ji L, Zhang S N, et al. Insight-HXMT firm detection of the highest-energy fundamental cyclotron resonance scattering feature in the spectrum of GRO J1008-57. The Astrophysical Journal Letters, 2020, 899(1): L19.

17 Li C K, Lin L, Xiong S L, et al. HXMT identification of a non-thermal X-ray burst from SGR J1935+2154 and with FRB 200428. Nature Astronomy, 2021, 5(4): 378-384.

18 Li Q L, Zhou Q, Liu Y, et al. Two-billion-year-old volcanism on the moon from Chang'e-5 basalts. Nature, 2021, 600: 54-58.

19 Hu S, He H C, Ji J L, et al. A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang'E-5. Nature, 2021, 600: 49-53.

20 吴季. 发展空间科学是建设世界科技强国的重要途径. 中国科学院院刊, 2017, 32(5): 504-511.

Wu J. Development of space science is one of the most important means for building up the world power in science and technology. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(5): 504-511. (in Chinese)

21 顾逸东. 气球科学观测100年. 现代物理知识, 2020, 32(2): 3-12.

Gu Y D. 100 years of balloon scientific observation. Modern Physics, 2020, 32(2): 3-12. (in Chinese)

22 Feng H, Li H, Long X, et al. Re-detection and a possible time variation of soft X-ray polarization from the Crab. Nature Astronomy, 2020, 4(5): 511-516.

23 王赤, 李超, 孙丽琳. 我国空间科学卫星任务国际合作管理实践与思考——以中国科学院空间科学战略性先导科技专项为例. 中国科学院院刊, 2020, 35(8): 1032-1040.

Wang C, Li C, Sun L L. International cooperation management practice of space science missions in China and related thinkings. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(8): 1032-1040. (in Chinese)

Thoughts on Space Science Development

GU Yidong*

(Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract Space science is a large-scale activity by using space vehicles to explore the universe and natural laws and carry out special experiments, which has made great contributions to the development of contemporary science. This paper outlines the major breakthroughs in international space science, analyzes the context and new trends of space science and manned exploration activities, reviews the development achievements of space science in China in the past 20 years, puts forward existing problems and gaps, and emphasizes the strategic position of space science and its importance to China's science and technology, aerospace and the national long-term development. It is proposed that increasing investment on space science, formulating national space science plans and establishing a stable budget system are the guarantee for the long-term and stable development of space science in China. It is suggested that in order to form an innovative path of space science development with Chinese characteristics, we shall make full use of scientific balloons, sounding rockets and other ways to consolidate the research foundation, strengthen the combination of theory, experiment and technology, cultivate a large number of high-quality scientists, promote international cooperation, and improve scientific program management.

Keywords space science, development planning, national budget, foundation of research, project management

顾逸东 中国科学院院士。中国载人航天工程空间科学首席专家，中国科学院空间应用中心学术委员会主任，两颗科学卫星工程总师。曾任中国科学院空间科学中心主任，中国科学院光电研究院院长，载人航天工程空间应用系统总设计师、总指挥，中国空间科学学会理事长。主持建立了我国科学气球系统，推动了我国气球宇宙射线、X射线天文和多学科高空科学探测，领导建设了载人航天天地一体化的空间应用技术体系，组织完成了神舟系列飞船和天宫系列空间实验室科学与应用任务，领导了空间站科学与应用任务规划论证。曾获全国五一劳动奖章、国家科技进步奖特等奖等。E-mail: ydgu@csu.ac.cn

GU Yidong Academician of Chinese Academy of Sciences. Prof. Gu is the Chief Expert of Space Science in the project of China Manned Space, Director of the Academic Committee of the Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences (CAS), and Chief Designer of two scientific satellites. He is the former Director of the National Space Science Center, CAS; Director of the Academy of Opto-electronics, CAS; Chief Designer and Commander of the space application system of China Manned Space, and Chairman of Chinese Society of Space Research. He initiated the scientific balloon system, promoted astronomical and multi-disciplinary high-altitude scientific explorations using cosmic ray and X-ray, led the establishment of an integrated space-ground space utilization technology system in China Manned Space, and also organized the utilization missions of Shenzhou series of spaceship, Tiangong space laboratory and the planning of space station. He has received the National May 1st Labor Medal and Special Prize for National Science and Technology Progress Award. E-mail: ydgu@csu.ac.cn

■责任编辑：文彦杰

*Corresponding author